技術報告

蒸気吹込み式直接加熱機の殺菌効果[†]

水口建治*・若尾庄児*・富田 守*・設楽英夫**
遠藤雅人**・吉田 勝***

The Sterilizing Effect of the Steam-Injection Type Direct Heating System

Kenji MIZUGUCHI*, Shoji WAKAO*, Mamoru TOMITA*, Hideo SHIDARA**,
Masato ENDO** and Masaru YOSHIDA***

* Food Research and Development Laboratory, Morinaga Milk Industry Co., Ltd.
5-1-83 Higashihara, Zama-shi, Kanagawa, 228

** Engineering Research Center, Morinaga Milk Industry Co., Ltd. 4-515
Tateno, Higashiyamato-shi, Tokyo, 207

*** Engineering Division, Morinaga Milk Industry Co., Ltd.
3-8 Konan, Minato-ku, Tokyo, 108

It has been observed that the sterilizing effect of the steam injection type direct heating sterilizer has been less than the apparent sterilizing effect which is estimated from the holding time and the temperature in the holding tube section. Because this type sterilizer sterilizes the product momentarily at an ultrahigh temperature only in the holding tube, the behavior of the steam and product with holding tube has a significant impact on the sterilization effect. In order to determine the factors which may reduce the sterilization effect within the holding tube, microbiological tests were carried out using a laboratory machine (100 l/h) and a practical machine (2 150 l/h). These tests were conducted with soybean milk inoculated with *Clostridium sporogenes* PA3679 spores. It was observed that cyclical fluctuations of temperature occurred in the holding tube. Calculations, estimated from data obtained from measuring the fluctuations, revealed that the fluctuations clearly had an impact on the sterilization effect and was a factor in reducing the accuracy of the apparent sterilization effect. Accordingly this must be fully taken into consideration when setting the sterilization conditions.

(Received May 22, 1995)

蒸気吹込み式直接加熱機の殺菌効果に関する研究

液状食品を連続的に加熱殺菌する装置の一つとして、蒸気吹込み式直接加熱殺菌機がある。通常、この装置は140℃～150℃前後の高温域における殺菌に用いられる。

この高温域での殺菌条件は、実際にさらされる温度よりも低い温度域において供試菌の耐熱性試験を行い、得られた耐熱性パラメーターに基づき推測した値が設定される。しかし、この様に低温域で得られた耐熱性パラメーターを基に推算した殺菌効果と比較して、殺菌機による

前報、文献3)

* 森永乳業(株)食品総合研究所 (〒228 神奈川県座間市東原 5-1-83)

** 森永乳業(株)装置開発研究所 (〒207 東京都東大和市立野 4-515)

*** 森永乳業(株)エンジニアリング部 (〒108 東京都港区港南 3-8)

高温域での殺菌効果は、しばしば低くなることが報告されている¹⁾²⁾。このような現象を引き起こす原因として、このタイプの殺菌機は保持管内のみで製品を高温瞬間殺菌するため、保持管内における蒸気と製品の制御精度に大きな要因があると考えられる。

ここで蒸気吹込み式直接加熱殺菌機の保持管における蒸気と液状食品の挙動について考慮すべき点は、(1) 蒸気が完全に凝縮するまでに一定の時間が必要であること、(2) 蒸気の凝縮水により保持管内流量が増加し、保持時間が短縮されること、(3) 液状食品と蒸気の混合が完全に行われない場合、保持管内に温度むらが生じる可能性があること、(4) 背圧不足の場合、蒸気の吹抜けが生じる可能性があること、(5) 殺菌時の保持管温度の振動による影響などが考えられる。

しかしながら、このような保持管部分に関して検討した詳しい報告はない。

著者らは殺菌効果に関する殺菌機側の問題を明らかにすることを目的として、蒸気吹込み式直接加熱殺菌機の保持管内のリアルタイム温度分布および速度変動を詳細に測定し前報³⁾で報告した。

本研究では、蒸気吹込み式直接加熱殺菌機の保持管における温度振動が、殺菌効果に与える影響について検討を行ったので報告する。

試料と実験方法

1. 実験装置

前報³⁾で用いた実験機（流量 100 l/h、殺菌部保持管径 8 mm）および実用機（流量 2 150 l/h、殺菌部保持管径 35.5 mm）を使用した。

2. 実験材料

試料流体としては、水および豆乳（固形分 10.4%、pH 6.5）を用いた。

殺菌効果を評価するために、(社)日本缶詰協会より入手した *Clostridium sporogenes* PA 3679 NCA 株（以下 PA 3679 と略す）を実験に供した。

3. PA 3679 胞子の調製

PA3679 胞子は GOLDONI らの方法⁴⁾に従い、牛心臓培地に脱脂粉乳を添加した胞子形成用培地にて多段階培養し調製した。この胞子溶液は使用するまで 4℃ に保存した。

4. PA 3679 胞子の耐熱性パラメーターの測定

得られた PA 3679 胞子について、毛細管法⁵⁾⁶⁾により M/15 リン酸緩衝液（pH 7.0）中および豆乳（固形分 10.4%、pH 6.5）の耐熱性パラメーターを求め、殺菌機に

よる殺菌試験の使用に対し、十分な耐熱性があることを確認した⁷⁾。

PA 3679 胞子を M/15 リン酸緩衝液（pH 7.0）に 3.8×10^6 /ml で懸濁し、82.2℃、13 分間加熱し栄養細胞を殺滅して胞子を活性化した。この懸濁液 25 μ l を毛細管に分注し、両端を火炎密封し、所定の時間と温度条件で加熱した後、ただちに冷却した。

この加熱処理した胞子懸濁液を 10 ml の滅菌 M/15 リン酸緩衝液（pH 7.0）で段階希釈し、それぞれの希釈液をアナエロビックパウチに 2 枚ずつ分注した。加熱処理を行った PA 3679 胞子の修復培地として、ODLAUG と PFLUG⁸⁾ による酵母エキスを寒天培地を使用し、7 日から 10 日間、30℃ で培養し培地に形成されたコロニーを計数した。

一方、毛細管法にて豆乳中における耐熱性パラメーターを求めることを試みたが、僅かながら豆乳蛋白質の微細な凝固が発生しデータがばらついた。これは毛細管中において豆乳が静止していることが原因であると考え、レトルトパウチと回転式レトルト殺菌機を使用して豆乳中における耐熱性パラメーターを求めた。

PA 3679 胞子を豆乳に 5.6×10^5 /ml で懸濁し、攪拌しながら 82.2℃、13 分間加熱し栄養細胞を殺滅して胞子を活性化した。この懸濁液をレトルトパウチ（130 × 160 mm）に 120 ml ずつ充填した後、レトルトトレイに固定し 15 rpm で回転させながらレトルト殺菌機にて、110℃、113℃、116℃と 120℃ にて所定時間加熱処理した。レトルトパウチ内の胞子懸濁液の温度は熱電対にて測定した。加熱時間はレトルトパウチ内の温度履歴曲線に基づいて補正した。生残胞子数の測定は、上述のリン酸緩衝液で用いた方法で行った。

5. 実用機の保持管背圧

適正な保持管背圧を求めるために、ポジションナー付き無菌コントロールバルブを使用し、次の試験を行った。

試験 (1)：試験流体は水を使用した。147℃ において温度および流量が安定した状態を作った後、背圧を変化させて、それぞれの背圧における保持管流量を電磁流量計（横河電機(株)製）で測定した。この電磁流量計は -10℃ から 160℃ の流体測定温度範囲および測定精度はスパンの $\pm 2.0\%$ 以内のものであり、Fig. 1 に示したように実用機の保持管入口部に設置した。

試験 (2)：試験流体は豆乳を使用し、試験 (1) と同様の試験を行った。

6. PA 3679 胞子接種豆乳に対する殺菌試験

PA 3679 胞子を接種した豆乳を実験機および実用機で

Fig. 1 Definition of mixing tube and holding tube

加熱処理し、細菌孢子の死滅率を算出した。

豆乳に接種した孢子濃度は、実験機 $8.4 \times 10^4/\text{ml}$ 、実用機 $7.6 \times 10^3/\text{ml}$ であった。

孢子接種豆乳はプレート式熱交換器により、 80°C に予備加熱した後、所定量の蒸気を吹込み加熱殺菌し、減圧蒸発室中で 78°C まで瞬間冷却し、吹込み蒸気凝縮水を回収した。

殺菌温度は実験機では 146°C 、 142°C 、 139°C の 3 条件で行った。実用機では 147°C で行い、3 回サンプリングした。保持時間は実験機が 2.4 秒、実用機が 2.2 秒とした。

また、保持管にかけた背圧は、保持管において蒸気の吹抜けが発生しない条件として、前項の実験から殺菌温度における蒸気圧との差圧が 0.8 kg/cm^2 となるように設定した。

実験結果と考察

1. PA 3679 孢子の耐熱性パラメーター

M/15 リン酸緩衝液 (pH 7.0) 中における PA3679 孢子の熱死滅曲線を Fig. 2 A に示した。この M/15 リン酸緩衝液中の PA3679 孢子の z 値は 10.2°C であり、回帰式より求めた $D_{121.1^\circ\text{C}}$ 値は 1.2 分であった。この値は PFLUG, ESSELEN⁹⁾ により報告された z 値 16.8°F (9.33°C)、 $D_{121.1^\circ\text{C}}$ 値 1.06 分と同等の値であり、この孢子の耐熱性は十分であると判断した。

Fig. 2 A Thermal death time curve for PA3679 spores suspended in M/15 neutral phosphate buffer

さらに豆乳 (固形分 10.4%, pH 6.5) 中における PA 3679 孢子の熱死滅曲線を Fig. 2 B に示した。豆乳中の孢子の z 値は 10.1°C であり、回帰式より求めた $D_{121.1^\circ\text{C}}$ 値は 1.5 分であった。

リン酸緩衝液中および豆乳中における耐熱性パラメーターで大きな差は確認されず、この孢子の耐熱性も十分高いものであるため、殺菌機による殺菌試験の指標菌と

Fig. 2 B Thermal death time curve for PA3679 spores suspended in soybean milk

して使用できると判断した。

2. 実用機の保持管背圧

試験 (1) および試験 (2) の結果を Fig. 3, 4 に示した。横軸には背圧と殺菌温度より求まる水の飽和蒸気圧との差 (以降, 圧力差という) をとり, 縦軸には電磁流量計により測定された流量と計算により求めた保持管流量の比 (以降, 流量比という) をとった。水および豆乳で行った 2 つの試験から, 同様に圧力差 0.8 kg/cm^2 以上において, 流量比は 1 になることが示された。従って, 保持管内において蒸気の不完全凝縮による吹抜け現象を防ぎ, 保持管流量を一定に保つために最低限必要な圧力差 (背圧と殺菌温度における飽和蒸気圧力の差) は, 0.8 kg/cm^2 以上であると判断した。

3. 実用機の蒸気の吹込み量と保持時間の算出

蒸気吹込み量を算出するため, 系全体 (蒸気, 豆乳および蒸気凝縮水 + 豆乳) のエンタルピーの収支計算を行った。Fig. 5 に実用機で水を 80°C から 147°C まで加熱した場合の状態と物性値を示す¹⁰⁾。流量と各流体の温度・圧力条件は, 豆乳を 147°C で殺菌する場合とほぼ同じである。なお, 豆乳の比熱 ($0.955 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) と密度 (1.00 kg/l , 80°C) の積は, 水の比熱 ($1.00 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$) と密度 (0.972 kg/l , 80°C) の積と有為な差はないので, 水の物性値を使用して計算した。

蒸気吹込み口の前において, 質量一定の式およびエンタルピー一定の式を解くと飽和蒸気量: X と蒸気吹込み後の水流量: Y が求まる。以下の式に用いる記号は Fig. 5 に示したものである。

Fig. 3 Effect of pressure difference on flow rate ratio, using water

The horizontal axis shows the difference between the back pressure and the saturation vapor pressure for water corresponding to 147°C (pressure difference). The vertical axis shows the ratio between the flow rate measured with the electromagnetic flowmeter and the calculated holding tube flow rate (flow rate ratio).

Fig. 4 Effect of pressure difference on flow rate ratio, using soybean milk

See Fig. 3.

Fig. 5 A heating condition of practical sterilizer

$$\frac{W}{V_1} + X = \frac{Y}{V_3} \quad (1)$$

$$\frac{WH_1}{V_1} + XH_2 = \frac{YH_3}{V_3} \quad (2)$$

(1), (2) 式より

$$X = \frac{W}{V_1} \left(\frac{H_2 - H_1}{H_2 - H_3} - 1 \right) \quad (3)$$

$$Y = \frac{V_3 W}{V_1} \left(\frac{H_2 - H_1}{H_2 - H_3} \right) \quad (4)$$

(3), (4) 式に数値を代入すると $X = 277.5 \text{ kg/h}$, $Y = 2574 \text{ l/h}$ となる。従って、蒸気吹き込み後の水流量と供給水流量の比 (Y/W) は、 147°C の場合で 1.20 となる。

保持管部の保持時間 (保持管長と保持管内流量) を明確に規定するために、保持管部において蒸気が混合・凝縮する部分 (以降、混合管と呼び、この混合管の通過時間を混合時間と呼ぶ) とそれ以降の流速、温度が安定し殺菌処理が有効に行われる部分 (以降、保持管と呼び、この保持管の通過時間を保持時間と呼ぶ) とに分けて検討した。PA 3679 孢子接種豆乳に対する殺菌試験における保持時間は、この定義に基づき設定した。

混合時間は前報³⁾の蒸気凝縮の試算結果を基に、次のように求めた。前報で 100 l/h の実験機における凝縮長さ L は $L = 250 \text{ mm}$ (配管内平均流速で除せば、 0.4 秒 の

保持時間相当の長さを消費する) と測定され、一方、計算では気泡の上昇距離 $h^* = 300 \text{ mm}$ となり測定値の 20% の誤差で求められた。一方、 2150 l/h の実用機では前報の計算で気泡の上昇距離 $h^* = 500 \text{ mm}$ と求められたため、凝縮長さ L は 420 mm 前後と推算される。これは配管内平均流速で除せば 0.6 秒 の保持時間相当の配管長さを消費することになる。

保持管入口部に設置した電磁流量計にて保持管流量を測定し、保持管内で蒸気が完全に凝縮し、計算通りの保持管流量になっていることを確認した。

4. PA 3679 孢子接種豆乳の殺菌試験結果と殺菌効果計算値との比較

PA 3679 孢子を接種した豆乳の殺菌試験結果と豆乳中の耐熱性パラメーターを基に求めた殺菌効果計算値について、実験機は Table 1 に、実用機は Table 2 に示した。

Table 1, 2 の Experimental results の欄における死滅率の対数 R , F 値を次式で求めた (N_0 は初期菌数, N_s は殺菌後生残菌数を示す)。

$$R = -\log (N_s/N_0) \quad (5)$$

$$F = R \times D_{121.1^\circ\text{C}} \quad (6)$$

この得られた F 値と保持時間 t (s), 供試菌の z 値を (7) 式に代入し、有効殺菌温度 T_e を求めた。

$$T_e = z \log \left(\frac{60 F}{t} \right) + 121.1 \quad (7)$$

また、Table 1, 2 に示した設定温度を基に計算した

Calculated values from experimental temperature の欄の各項目は次式で求めた.

$$F = \left(\frac{t}{60} \right) \times 10^{(T-121.1)/Z} \quad (8)$$

Table 1 Results of laboratory machine sterilization test on soybean milk inoculated with PA 3679 spores^{a) b)}

	Experimental results			Calculated values from experimental temperature			Estimated values from fluctuation of sterilization temperature ^{e)}		
	Exp. 1 146.0°C	Exp. 2 142.0°C	Exp. 3 139.0°C	Exp. 1 146.0°C	Exp. 2 142.0°C	Exp. 3 139.0°C	Exp. 1 146.0°C	Exp. 2 142.0°C	Exp. 3 139.0°C
No. of surviving spores after sterilization (per ml) Ns	0.033 ^{c)}	210	2.4×10 ³						
Sterilization effect									
R	6.41 ^{d)}	2.60 ^{d)}	1.54 ^{d)}	7.79	3.13	1.58	6.86	2.93	1.54
F	9.62	3.90	2.31	11.69	4.70	2.37	10.29	4.40	2.30
Effective sterilization									
temperature (°C) T _e	145.15	141.19	138.89	146.00	142.00	139.00	145.44	141.72	138.88
T ^{f)} —T _e	0.85	0.81	0.11	—	—	—	0.56	0.28	0.12

^{a)} Initial number of spores in soybean milk (No) : 8.4×10⁴/ml. Heat resistance parameters : Z value = 10.1°C. D_{121.1°C} value = 1.5 min.

^{b)} Holding time : 2.4 sec.

^{c)} Computed by MPN method

^{d)} Order of reduction in number of spores [Log (No/Ns)]

^{e)} Fluctuation of experimental temperature : ±1.0°C

^{f)} Experimental temperature

Table 2 Results of practical machine sterilization test on soybean milk inoculated with PA 3679 spores^{a) b)}

	Experimental results			Calculated values from experimental temperature 147.0°C	Estimated values from fluctuation of sterilization temperature ^{e)} 147.0°C
	Exp. 1 147.0°C	Exp. 2 147.0°C	Exp. 3 147.0°C		
No. of surviving spores after sterilization (per ml) Ns	0.0046 ^{c)}	0.0048 ^{c)}	0.0095 ^{c)}		
Sterilization effect					
R	6.22 ^{d)}	6.20 ^{d)}	5.90 ^{d)}	8.97	7.13
F	9.33	9.30	8.85	13.46	10.70
Effective sterilization					
temperature (°C) T _e	145.40	145.38	145.16	147.00	146.00
T ^{f)} —T _e	1.60	1.62	1.86	—	1.00

^{a)} Initial number of spores in soybean milk (No) : 7.6×10³/ml. Heat resistance parameters : Z value = 10.1°C. D_{121.1°C} value = 1.5 min.

^{b)} Holding time : 2.2 sec.

^{c)} Computed by MPN method

^{d)} Order of reduction in number of spores [Log (No/Ns)]

^{e)} Fluctuation of experimental temperature : ±1.5°C

^{f)} Experimental temperature

$$R = F/D_{121.1^\circ\text{C}} \quad (9)$$

設定温度を基に計算して求めた R と比較すると、得られた殺菌試験の実測死滅率の対数 R は、明らかに低い値であった。

また、設定温度に対し有効殺菌温度は、実験機で設定温度 139°C 、 142°C 、 146°C のそれぞれに対し、 0.11°C 、 0.81°C 、 0.85°C 、実用機で設定温度 147°C に対し $1.60 \sim 1.86^\circ\text{C}$ 低いことが計算された。

5. 温度振動がある場合の殺菌効果の推算

通常、保持管温度とは保持管出口部の温度を示すが、Fig. 6, 7 に示した通り、実測の殺菌温度が実験機で設定温度の $\pm 1^\circ\text{C}$ 、実用機で設定温度の $\pm 1.5^\circ\text{C}$ の幅で振動していた。このような温度振動が殺菌効果に与える影響について検討した。

まず、実験機については1分間の温度測定データから1秒置きの温度データを、実用機については8分30秒間の温度測定データから15秒置きの温度データをプロットした結果、両機共に温度振動はサインカーブで近似された。この実測温度データおよびサインカーブで近似した値で殺菌効果を推算した結果、Table 3 に示した通

り、両者の間でほとんど差がなかった。従って、以下の推算にあたっては、実測温度データでの偏りを防ぐために、サインカーブで近似した値を用いた。

まず、サインカーブで近似して得た温度データ $T (^\circ\text{C})$ 毎に供試菌の z 値とその保持時間 t (s) を (8) 式に代入して F 値を求めた。さらに (9) 式よりそれぞれの R を計算し、各 R に対する生残率 N_s/N_o を次式で求めた。

$$N_s/N_o = 10^{-R} \quad (10)$$

これより、殺菌体積 V 、温度 T によって殺菌された体積を dV とすると、次式から平均 N_s/N_o が求められる。

$$\left(\frac{N_s}{N_o}\right)_{\text{over all}} = \frac{\int_0^V \left(\frac{N_s}{N_o}\right)_T dV}{V} \quad (11)$$

実際には温度データ T 毎に (10) 式より求めた N 個の N_s/N_o を基に次式で平均 N_s/N_o を求めた。

$$\left(\frac{N_s}{N_o}\right)_{\text{over all}} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{N_s}{N_o}}{N} \quad (12)$$

続いて、平均 F 値を次式で求めた。

$$F = -\log \left(\frac{N_s}{N_o}\right)_{\text{over all}} \times D_{121.1^\circ\text{C}} \quad (13)$$

Fig. 6 Time fluctuation of temperature in the laboratory machine

Fig. 7 Time fluctuation of temperature in the practical machine

Table 3 Comparison of effective sterilization temperatures as estimated by actual measurement and sine curve

Experimental temperature	Effective sterilization temperature estimated by :	
	Actual measurement	Sine curve
139°C	138.83°C	138.88°C
142°C	141.66°C	141.72°C
146°C	145.40°C	145.44°C

この平均 F 値を (7) 式に代入し、温度振動がある場合の有効殺菌温度 T_e を求めた。

温度振動がある場合の有効殺菌温度は Table 1, 2 に示した通り、実験機で設定温度 139°C, 142°C, 146°C のそれぞれに対し、0.12°C, 0.28°C, 0.56°C 低く、実用機で設定温度 147°C に対し 1.0°C 低いことが計算された。

このように保持管における温度振動は、低温域で求めた耐熱性パラメーターを基に推算した殺菌効果と殺菌機による実測値との間で差が生じる原因の一つであることが示唆された。

また、さらに残る設定温度と有効殺菌温度との差は、実験機で約 0.3~0.5°C, 実用機で約 0.6~0.9°C 低いことが示された。この差については前報³⁾で報告した保持管の同一断面上で発生する温度のバラツキがその一因であると考えられる。

一方、混合管中における殺菌効果についても考慮すべき要因であるが、測定することは技術的に困難である。

従って、このタイプの殺菌機を使用し商業的な目的で殺菌処理を行うためには、耐熱性パラメーターの明らかな指標菌を液状食品に接種し、その実測値を基にその殺菌機の殺菌条件の妥当性を評価することが安全な製品を作る上で必要と考えられる。

要 約

指標細菌の耐熱性パラメーターに基づき計算される殺菌効果と蒸気吹込み式殺菌機による実測値との間で差が生じる原因として、殺菌機の保持管における温度振動が、殺菌効果に与える影響について検討を行った。

100 l/h の実験機および 2150 l/h の実用機を用いて、保持管における温度振動が、殺菌効果に与える影響について検討を行い、次の知見を得た。

1) 保持管内で蒸気の吹抜けを防ぐために、背圧弁によって制御し、保持管内圧を殺菌温度における蒸気圧より 0.8 kg/cm² 以上高くする必要がある。

2) 保持管温度の振動データを基に殺菌効果を推算した結果、保持管温度の振動は殺菌効果を低下させる要因の一つであることが示唆された。

3) 商業的な目的で殺菌処理を行うためには、このタイプの殺菌機は、制御上の変動要因が多いため実際に耐熱性菌を液状食品に接種し、殺菌条件の妥当性を評価することが必要と考えられる。

文 献

- 1) FRANKLIN, J.G., UNDERWOOD, H.M., PERKIN, A.G. and BURTON, H.: *J. Dairy Res.*, **37**, 219 (1970).
- 2) BURTON, H., PERKIN, A.G., DAVIES, F.L. and UNDERWOOD, H.M.: *J. Fd. Technol.*, **12**, 149 (1977).
- 3) 設楽英夫・遠藤雅人・千田稔洋・渡辺良三・水口建治・山本一巳・上和野満雄: 日食工誌, **41**, 803, (1994).
- 4) GOLDONI, J.S., KOJIMA, S., LEONARD, S. and HEIL, J.R.: *J. Food Sci.*, **45**, 467 (1980).
- 5) STERN, J.A. and PROCTOR, B.E.: *Food Tech.*, **8**, 139 (1954).
- 6) WILDER C.J. and NORDAN, H.C.: *Food Res.*, **22**, 462 (1957).
- 7) 設楽英夫・神崎幹雄・水口建治・小此木成夫・栗山雅文・今野宏卓: 化学工学論文集, **17**, 220, (1991).
- 8) ODLAUG, T.E. and PFLUG, I.J.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **34**, 377 (1977).
- 9) PFLUG, I.J. and ESSELEN, W.B.: *Food Technol.*, **7**, 237 (1953).
- 10) 日本機械学会: ISME 蒸気表, (1968).

(平成 7 年 5 月 22 日受理)